

⑤1

Int. Cl. 2:

H 01 8 000

①9 BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

DEUTSCHES



PATENTAMT

1A 836 22 57 1A  
DT 25 22 338 1A

①1

# Offenlegungsschrift 25 22 338

②1

Aktenzeichen:

P 25 22 338.5

②2

Anmeldetag:

20. 5. 75

④3

Offenlegungstag:

4. 12. 75

③0

Unionspriorität:

③2 ③3 ③1

20. 5. 74 Japan 55424-74

2. 8. 74 Japan 88075-74

24. 1. 75 Japan 9718-75

28. 2. 75 Japan 24003-75

⑤4

Bezeichnung:

Generator zur Erzeugung kohärenten Lichts

⑦1

Anmelder:

Hitachi, Ltd., Tokio

⑦4

Vertreter:

Schiff, K.L.; Föner, A.v., Dr.; Strehl, P., Dipl.-Ing.; Schübel-Hopf, U., Dr.;  
Ebbinghaus, D., Dipl.-Ing.; Pat.-Anwälte, 8000 München

⑦2

Erfinder:

Ito, Masaru, Kokubunji, Tokio;  
Yamamoto, Manabu, Odawara, Kanagawa; Saito, Susumo;  
Ueyanagi, Keiichi; Hachioji; Hashimoto, Akira, Ohme; Tokio;  
Nakamura, Isamu, Ishikawa; Kohmoto, Mahito, Tokio (Japan)

BEST AVAILABLE COPY

⑥ 11. 75 509 849/731

18/70

AI

1A 836 77 67 1A

PATENTANWÄLTE

DR. O. DITTMANN  
K. L. SCHIFF  
DR. A. v. FÜNER  
DIPL. ING. P. STREHL  
DR. U. SCHÜBEL-HOPF  
DIPL. ING. D. EBBINGHAUS

2522338

D-8 MÜNCHEN 90  
MARIAHILFPLATZ 2 & 8

POSTADRESSE  
D-8 MÜNCHEN 95  
POSTFACH 95 0180

TELEFON (089) 48 20 54  
TELEGR. AUROMARCPAT MÜNCHEN  
TELEX 5-23585 AURO D

H I T A C H I, LTD.

DA-11711

20. Mai 1975

Generator zur Erzeugung kohärenten Lichts

Prioritäten: 20. Mai 1974, Japan, Nr. 55 424  
2. Aug. 1974, Japan, Nr. 88 075  
24. Jan. 1975, Japan, Nr. 9 718  
28. Febr. 1975, Japan, Nr. 24 003

Die Erfindung bezieht sich auf einen Generator zur Erzeugung kohärenten Lichts, mit dem in seiner Wellenlänge umgewandeltes kohärentes Licht erzeugt werden kann.

Bisher wird kohärentes Licht auf zweierlei Weise erzeugt, nämlich durch Erzeugung von Laserlicht und durch Umwandlung der Wellenlänge von Laserlicht mittels Zusammenwirkens oder Beeinflussung von Licht mit einem geeigneten Material.

Lichtquellen, die kohärentes Licht im sichtbaren oder ultravioletten Bereich abgeben, haben einen geringen Wirkungsgrad, und sie sind verhältnismäßig umfangreich. Ein Verfahren zur Erzeugung kurzwelligen kohärenten Lichts ist die Erzeugung einer zweiten harmonischen Welle aus dem Licht einer längerwelligen kohärenten Lichtquelle.

509849/0731

Wenn kohärentes Licht erzeugt werden soll, dessen Wellenlänge kürzer als die der zweiten Harmonischen ist, kann die dritte Harmonische durch Mischung des Laserlichts mit der zweiten Harmonischen erzeugt werden, d.h. durch Summenfrequenzbildung.

Weiter ist die Summenfrequenzbildung durch Mischung der zweiten Harmonischen, nämlich die Erzeugung der vierten Harmonischen bekannt. Der Wirkungsgrad als Lichtquelle nimmt jedoch mit steigender Anzahl der Wellenlängen-Umwandlungsstufen ab.

Die zweite Harmonische kann durch Zusammenwirken des Grund-Laserlichts mit einem nichtlinearen optischen Material erzeugt werden. Das Laserlicht und seine zweite Harmonische können durch Zusammenwirken mit einem nichtlinearen optischen Material gemischt und in Licht der Summenfrequenz umgewandelt werden.

Zur wirtschaftlichen Erzeugung höherer Harmonischer werden die nichtlinearen Materialien üblicherweise so gewählt, daß die folgenden Phasenabstimmungsbeziehungen erfüllt sind, und zwar bei der Erzeugung der zweiten Harmonischen

$$n_2\left(\frac{\lambda}{2}\right) = n_1(\lambda)$$

und

für den Fall der optischen Summenfrequenzbildung

$$n_3\left(\frac{\lambda}{3}\right) = \frac{1}{3}n_1(\lambda) + \frac{2}{3}n_2\left(\frac{\lambda}{2}\right),$$

worin  $n_1(\lambda)$ ,  $n_2\left(\frac{\lambda}{2}\right)$  und  $n_3\left(\frac{\lambda}{3}\right)$  die Brechungsindizes der Materialien zur Erzeugung höherer Harmonischer des Laserlichts, der zweiten Harmonischen bzw. der Summenfrequenzwelle und  $\lambda$  die Wellenlänge des Laserlichts sind.

Bei der Erzeugung der zweiten Harmonischen werden zwei Photonen des Laserlichts in ein Photon der zweiten Harmonischen

509849/0731

umgewandelt. Dementsprechend ist der Wirkungsgrad bei der Umwandlung des Laserlichts in die zweite Harmonische proportional zum Quadrat der Intensität des Laserlichts am Material zur Erzeugung der zweiten Harmonischen. Die zweite Harmonische wird in Ausbreitungsrichtung des Laserlichts erzeugt.

Bei der Erzeugung der optischen Summenfrequenzwelle werden ein Photon des Laserlichts und ein Photon der zweiten Harmonischen in ein Photon der Summenfrequenzwelle umgewandelt. Der Wirkungsgrad dieser Umwandlung bei der Summenfrequenzbildung ist daher proportional dem Produkt der Intensitäten des Laserlichts und seiner zweiten Harmonischen. Die Summenfrequenzwelle wird in Ausbreitungsrichtung des Laserlichts und seiner zweiten Harmonischen erzeugt.

Da der Wirkungsgrad der Erzeugung der Höherharmonischen von den Intensitäten des Laserlichts und der zweiten Harmonischen abhängt, werden zweckmäßigerweise die Materialien zur Erzeugung der Höherharmonischen im Laserresonator angeordnet.

Zur weiteren Erläuterung sei auf die Zeichnung Bezug genommen. Es zeigen:

- Fig. 1 bis 10 Querschnitte eines bekannten bzw. erfindungsgemäßer Generatoren zur Erzeugung kohärenten Lichts;
- Fig. 11 ein Beispiel des Aufbaues eines Wellenlängenwählelements, das bei dem Generator zur Erzeugung kohärenten Lichts der Fig. 9 und 10 verwendet wird;
- Fig. 12 den Querschnitt eines erfindungsgemäßen Generators zur Erzeugung kohärenten Lichts;
- Fig. 13 in einem Diagramm die Erscheinung des Auswanderns bei einem nichtlinearen Material zur Erzeugung einer harmonischen Welle;
- Fig. 14 und 15 den Aufbau nichtlinearer Elemente zur Erzeugung der Harmonischen bei dem erfindungsgemäßen Generator zur Erzeugung kohärenten Lichts.

Fig. 1 zeigt einen Summenfrequenzwellengenerator, der aus einem laseraktiven Material 1, einem Material 2 zur Erzeugung einer zweiten Harmonischen und einem Material 3 zur Erzeugung einer Summenfrequenz besteht, die zwischen einem optischen Resonator bildenden Reflexionsspiegeln 4 und 5 angeordnet sind. Dieser Generator hat den Nachteil, daß die zweite Harmonische sowohl auf der linken als auch auf der rechten Seite des Materials 2 zur Erzeugung der zweiten Harmonischen entsteht und die sich durch das laseraktive Material ausbreitende zweite Harmonische durch das laseraktive Material absorbiert wird. Die absorbierte Komponente der zweiten Harmonischen geht verloren.

Ein Teil der in das Material 3 zur Erzeugung der Summenfrequenz eindringenden zweiten Harmonischen wird in die Summenfrequenzwelle umgewandelt, die durch den Reflexionsspiegel 4 vom optischen Resonator abgeleitet werden kann. Es werden jedoch auch ein Rest des Grundlaserlichts und ein Teil der zweiten Harmonischen durch den Reflektor 4 reflektiert. Diese reflektierten Komponenten breiten sich wieder zum Material 3 zur Erzeugung der Summenfrequenzwelle aus, und die neuerlich erzeugte Summenfrequenzwelle gelangt zum Material 2 zur Erzeugung der zweiten Harmonischen. Diese Summenfrequenzkomponente wird ebenfalls durch das Material 2 zur Erzeugung der zweiten Harmonischen oder das laseraktive Material absorbiert und geht somit verloren.

Damit sich die optischen Wege der zweiten Harmonischen und der Laserlichts räumlich gut überlappen, erfüllt vorzugsweise das Material 2 zur Erzeugung der zweiten Harmonischen die  $90^\circ$ -Phasenanpassungs- oder -gleichbedingung (phase-matching).

Die meisten, die obige Beziehung erfüllenden Materialien haben einen hohen Umwandlungswirkungsgrad. Ihre Absorptionsbänder reichen vom kurzen sichtbaren bis zum ultravioletten

509849/0731

Licht. Fällt die Wellenlänge der Summenfrequenz in den obigen Wellenlängenbereich, so wird infolge der durch die Absorption der Summenfrequenzwelle erzeugte Wärme der Phasenabgleich beim Material 2 zur Erzeugung der zweiten Harmonischen instabil. Das Material zur Erzeugung der zweiten Harmonischen kann sogar durch die erzeugte Wärme zerstört werden.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, einen Generator zur Erzeugung kohärenten Lichts zu schaffen, bei dem die Nachteile des Standes der Technik vermieden sind und bei dem die Summenfrequenzwelle durch Mischung des Grundlaserlichts mit der zweiten harmonischen Welle mit hohem Wirkungsgrad erzeugt werden kann.

Der erfindungsgemäße Generator zur Erzeugung kohärenten Lichts enthält einen optischen Resonator, ein laseraktives Material, ein wellenlängenselektives Element zur Ableitung von Licht einer bestimmten Wellenlänge aus dem optischen Resonator, ein Material zur Erzeugung einer Summenfrequenzwelle und ein Material zur Erzeugung einer zweiten Harmonischen. Das wellenlängenselektive Element, das Material zur Erzeugung der Summenfrequenzwelle und das Material zur Erzeugung der zweiten Harmonischen sind innerhalb des optischen Resonators in einer solchen Reihenfolge angeordnet, daß, längs des optischen Weges des optischen Resonators, das laseraktive Material auf der einen und das Material zur Erzeugung der Summenfrequenzwelle und das Material zur Erzeugung der zweiten Harmonischen auf der gegenüberliegenden Seite des selektiven Elements angeordnet sind.

Fig. 2 zeigt ein erstes bevorzugtes Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Generators zur Erzeugung kohärenten Lichts. Er enthält ein laseraktives Material 1 zur Erzeugung der Grundwelle, ein Material 2 zur Erzeugung der zweiten Harmonischen und ein Material 3 zur Erzeugung der dritten Harmonischen. Reflektoren 4 und 5 bilden einen Laserresonator.

Der Reflektor 5 hat für Laserlicht ein hohes Reflexionsvermögen; der Reflektor 4 hat ein hohes Reflexionsvermögen sowohl für das Laserlicht als auch für seine zweite Harmonische. Ein wellenlängenselektiver Reflexionsspiegel 6 ist in dem Laserresonator so angeordnet, daß das Licht vom Reflektor 5 zum Reflektor 4 gelenkt wird. Der Reflexionsspiegel 6 hat für das Grundlaserlicht ein hohes Reflexionsvermögen.

Er ist gegenüber der dritten Harmonischen transparent, so daß die Höherharmonischen aus dem Resonator ausgeleitet werden können. Der Reflexionsspiegel 6 kann auch gegenüber der zweiten Harmonischen transparent ausgeführt werden, wenn die zweite Harmonische aus dem Resonator ausgeleitet werden soll.

Bei dem gemäß Fig. 2 aufgebauten Generator kann die Größe der zweiten Harmonischen, die nach der Reflexion an den Reflektoren 5 und 6 auf das Material zur Erzeugung der Summenfrequenz fällt, infolge der Absorption der zweiten Harmonischen durch das laseraktive Material 3 und die hohe Übertragung des Reflexionsspiegels 6 bezüglich der zweiten Harmonischen sehr gering gehalten werden. Demzufolge ist die auf das Material zur Erzeugung der zweiten Harmonischen fallende dritte Harmonische sehr gering.

Da die in Richtung des Reflektors 4 erzeugte Komponente der zweiten Harmonischen durch diesen reflektiert wird, trägt der größte Teil der zweiten Harmonischen wirksam zur Erzeugung der Summenfrequenzwelle bei. Wenn das laseraktive Material, das Material zur Erzeugung der zweiten Harmonischen und das Material zur Erzeugung der Summenfrequenzwelle in der beschriebenen Reihenfolge innerhalb eines Laserresonators angeordnet sind, ist es zweckmäßig, die Harmonische durch den Spiegel 6 aus dem Resonator auszuleiten. Wenn sowohl die zweite Harmonische als auch die Summenfrequenzwelle durch den Spiegel 6 aus dem Resonator ausgeleitet werden, breiten sie sich zusammen in der gleichen Richtung aus. Diese Tatsache vereinfacht den Aufbau des optischen Systems

509849/0731

in vielen Anwendungsfällen.

Fig. 3 zeigt ein weiteres Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Generators. Die Reflektoren 4 und 5 bilden einen Laserresonator mit dem zwischengeschalteten Reflektor 6. Ein laseraktives Material 1, beispielsweise mit Neodymium dotierter Yttriumaluminiumgranat, ist in dem Resonator angeordnet. Als Material 2 zur Erzeugung der zweiten Harmonischen dient vorzugsweise eine Substanz, die die  $90^\circ$ -Phasen Anpassungsbeziehung erfüllt, beispielsweise Bariumnatriumniobat ( $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ ), Kaliumniobat ( $\text{KNbO}_3$ ) oder Cäsiumdihydrogenarsenat ( $\text{CsH}_2\text{AsO}_4$ ). Die zweite Harmonische (gestrichelt dargestellt) wird dem Grundlaserlicht (mit durchgehenden Linien dargestellt) überlagert und breitet sich in der gleichen Richtung aus wie das auftreffende Grundlaserlicht. Da der Reflektor 4 mit einem bezüglich des Grundlaserlichts und der zweiten Harmonischen stark reflektierenden Überzug versehen ist, wird die zum Reflektor 4 gerichtete zweite Harmonische ohne Verlust nach außen reflektiert. Die reflektierte zweite Harmonische wird der zweiten Harmonischen überlagert, die zum Material 3 zur Erzeugung der Summenfrequenzwellen emittiert wird. Die resultierende zweite Harmonische fällt auf das Material 3 zur Erzeugung der Summenfrequenz. Das Material 3 zur Erzeugung der Summenfrequenz ist z.B. Lithiumjodat ( $\text{LiIO}_3$ ) oder Ammoniumdihydrogenphosphat ( $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ). Nur wenn die Ausbreitungsrichtungen des auftreffenden Grundlaserlichts und der zweiten Harmonischen im wesentlichen identisch sind, wird die (strichpunktiiert dargestellte) Summenfrequenzwelle erzeugt. Sie breitet sich in der gleichen Richtung wie die auftreffenden Strahlen aus. Der Reflektor 6 ist mit einem Überzug versehen, der das Grundlaserlicht stark reflektiert und die Summenfrequenzwelle in starkem Maße durchläßt. Am Reflektor 6 kann daher die erzeugte Summenfrequenzwelle ausgeblendet werden. Die zweite Harmonische kann gewünschtenfalls ebenfalls am Reflektor 6 ausgeblendet werden, wenn dieser gegenüber der



zweiten Harmonischen durchlässig gemacht wird. Die zweite Harmonische und ein sehr geringer Anteil der Summenfrequenzwelle, die vom Reflektor 6 reflektiert werden, werden vom laseraktiven Material 1 in starkem Maße absorbiert. Die nicht absorbierten Komponenten fallen auf den Reflektor 5. Die Reflexion der zweiten Harmonischen und der Summenfrequenzwelle vom Reflektor 5 kann vermieden werden, wenn dieser mit einem Überzug oder Film versehen ist, der das Grundlaserlicht reflektiert und die zweite Harmonische sowie die Summenfrequenzwelle durchläßt. Der Laserresonator wird nur dann mit einem Modulator 7 versehen, wenn das Grundlaserlicht moduliert werden soll. Sonst ist der Modulator 7 nicht notwendig. Mit dem Ausdruck "Modulation" sind hier die Laserbetriebsarten, beispielsweise die Q-Schaltung und Synchronisationen (locking), gemeint.

Die Oberflächen des laseraktiven Materials 1, des Materials 2 zur Erzeugung der zweiten Harmonischen, des Materials 3 zur Erzeugung der Summenfrequenz und des Modulators 7, auf die das Grundlaserlicht, die zweite Harmonische und die Summenfrequenzwelle fallen, sind mit Antireflexionsüberzügen 1', 1'', 2', 2'', 3', 3'', 7' bzw. 7'' versehen. Hierdurch kann der Anteil des Lichts der zweiten Harmonischen, der vom Reflektor 6 reflektiert wird und auf das Material 3 zur Erzeugung der Summenfrequenzwelle fällt, vernachlässigt werden. Damit wird keine sich zum Material 2 zur Erzeugung der zweiten Harmonischen ausbreitende Summenfrequenzwelle erzeugt. Kristalle mit großem nichtlinearem optischem Koeffizienten, beispielsweise Bariumnatriumniobat und Kaliumniobat, absorbieren Licht, dessen Wellenlänge kürzer als etwa  $0,4 \mu$  ist. Wenn daher unter Verwendung eines mit Neodymium dotierten Yttriumaluminiumgranatkristalls als laseraktives Material 1 Laserlicht mit einer Wellenlänge von  $1,06 \mu$  erzeugt wird, absorbiert das die zweite Harmonische erzeugende Material das darauf treffende Summenfrequenzlicht. Durch die Absorption steigt die Temperatur des die zweite Harmo-

509849/0731

nische erzeugenden Materials an, so daß die Energie der zweiten Harmonischen instabil wird oder das die zweite Harmonische erzeugende Material zerstört wird. Wegen der Verwendung der oben erwähnten Kristalle ist es zur Erzeugung der Summenfrequenzwelle mit hohem Wirkungsgrad erforderlich, das Auftreffen der Summenfrequenzwelle auf das die zweite Harmonische erzeugende Material zu vermeiden. Diese Forderung wird durch die erfindungsgemäße Anordnung erfüllt.

Zur wirksamen Erzeugung der zweiten Harmonischen und der Summenfrequenzwelle muß die Phasenanpassungsbeziehung erfüllt sein. Bei Verwendung von Bariumnatriumniobat oder Kaliumniobat zur Erzeugung der zweiten Harmonischen muß der Kristall so angeordnet sein, daß das Grundlaserlicht ordentliches Licht und die zweite Harmonische außerordentliches Licht ist. Bei Verwendung von Lithiumjodat als Material zur Erzeugung der Summenfrequenzwelle sind vorzugsweise das Grundlaserlicht und die zweite Harmonische ordentliches oder gewöhnliches Licht. Um diese Bedingungen gleichzeitig zu erfüllen, ist zweckmäßigerweise das Grundlaserlicht nicht polarisiert. Der Modulator 7 wird daher vorzugsweise so gewählt, daß er gegenüber der Polarisierung des auftreffenden Lichts unempfindlich ist. Hierzu kann eine akusto-optische Beugungseinrichtung verwendet werden.

Fig. 4 zeigt ein drittes Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Generators. Hier befindet sich zwischen den Reflektoren 5 und 6 der Fig. 3 ein zusätzlicher Reflektor 8. Die vier Reflektoren 4, 5, 6 und 8 bilden einen Laserresonator. Die Reflektoren 6 und 8 sind mit einem Überzug oder Film versehen, der annähernd 100 % des Grundlaserlichts reflektiert und wenigstens die Summenfrequenzwelle am stärksten durchläßt. Die Reflektoren 4 und 5, das Material 2 zur Erzeugung der zweiten Harmonischen und das Material 3 zur Erzeugung der Summenfrequenzwelle sind mit den gleichen Reflexions- oder Antireflexionsüberzügen wie bei dem Ausführungsbeispiel der Fig. 3 versehen. Beim Ausführungs-

509849/0731

beispiel der Fig. 4 wird die erzeugte Summenfrequenzwelle vom Reflektor 6 oder 8 nach außen ausgeblendet. Obwohl der vier Spiegel enthaltende Aufbau hinsichtlich der Einstellung komplizierter ist als der mit drei Reflektoren, ist er insofern vorteilhaft, als in einfacher Weise ein Resonator geschaffen wird, der den Wirkungsgrad der Erzeugung der zweiten Harmonischen und der Summenfrequenzwelle verbessert. Bei dem Aufbau der Fig. 4 wird der Durchmesser des Grundlaserstrahls an den Stellen des Materials 2 zur Erzeugung der zweiten Harmonischen und des Materials 3 zur Erzeugung der Summenfrequenzwelle klein, wodurch die Lichtintensität erhöht wird.

Bei dem Ausführungsbeispiel der Fig. 4 kann das die Summenfrequenz erzeugende Material 3 zwischen den Reflektoren 6 und 8 angeordnet werden. Dabei ist der Reflektor 6 mit einem reflektierenden Film versehen, der das Grundlaserlicht, die zweite Harmonische und das Summenfrequenzlicht überwiegend reflektiert, während der Reflektor 8 mit einem Reflexionsfilm versehen ist, der das Grundlaserlicht zu fast 100 % reflektiert und die zweite Harmonische sowie das Summenfrequenzlicht in überwiegendem Maße durchläßt. Auf diese Weise können unabhängig Resonatoren geschaffen werden, die für die Erzeugung der zweiten Harmonischen und der Summenfrequenzwelle am besten geeignet sind, und die Wirkungsgrade der Umwandlung in Licht dieser Wellenlängen können weiter verbessert werden.

Als Überzüge der Reflektoren 4, 5, 6 und 8 können mehrschichtige Filme aus dielektrischen Substanzen verwendet werden. Wie bekannt, können gegenüber beliebigen Wellenlängen stark reflektierende und stark durchlässige Reflektoren durch mehrschichtiges Aufdampfen dielektrischer Substanzen, beispielsweise Magnesiumfluorid und Ceriumoxid, hergestellt werden.

Gemäß der vorstehenden Erläuterung werden als Material 2

509849/0731

zur Erzeugung der zweiten Harmonischen Materialien verwendet, die die  $90^\circ$ -Phasen Anpassungsbeziehung erfüllen. Wenn aber die Lichtstrahlen unterschiedlicher Wellenlängen räumlich nicht beträchtlich voneinander abweichen, können beliebige nichtlineare optische Materialien verwendet werden, die die  $90^\circ$ -Phasenabgleichbeziehung nicht erfüllen. Gleichfalls kann das die dritte Harmonische erzeugende Material 3 ein von den oben erwähnten Materialien abweichendes nichtlineares optisches Material sein. In jedem Fall ist die Erfüllung der  $90^\circ$ -Phasenabgleichbeziehung wünschenswert; die Wahl der Substanz ist jedoch frei.

Fig. 5 zeigt in einem vierten Ausführungsbeispiel einen Laserresonator zwischen den Reflektoren 4 und 5, dessen Weg gebogen ist und der eine laseraktive Substanz 1 (z.B. einen mit Neodymium dotierten Yttriumaluminiumgranatkristall) 1 und ein Prisma 10 enthält. Als Material 2 zur Erzeugung der zweiten Harmonischen ist es unter den obigen Bedingungen zweckmäßig, eine Substanz zu verwenden, die die Bedingung der  $90^\circ$ -Phasen Anpassung oder -übereinstimmung erfüllt, beispielsweise Bariumnatriumniobat ( $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ ), Kaliumniobat ( $\text{KNbO}_3$ ), Lithiumniobat ( $\text{LiNbO}_3$ ) oder Cäsiumdihydrogenarsenat ( $\text{CsH}_2\text{AsO}_4$ ). Die erzeugte zweite Harmonische (gestrichelte Linien) wird dem Grundlaserlicht (ausgezogene Linien) überlagert und breitet sich in der gleichen Richtung wie das Grundlaserlicht aus. Der Reflektor 4 ist mit einem Reflexionsfilm versehen, der das Grundlaserlicht und die zweite Harmonische zu fast 100 % reflektiert. Die zum Reflektor 4 gerichtete zweite Harmonische wird somit ohne Verlust nach außen reflektiert und der zur Substanz 3 zur Erzeugung der Summenfrequenzwelle gerichteten zweiten Harmonischen überlagert. Die resultierende zweite Harmonische trifft auf die Substanz 3 zur Erzeugung der Summenfrequenzwelle, die beispielsweise aus Lithiumjodat ( $\text{LiIO}_3$ ) oder Ammoniumdihydrogenphosphat ( $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ) besteht und wirksam Licht der Summenfrequenz

(strichpunktierte Linien) erzeugt, da die Ausbreitungsrichtungen des auftreffenden Grundlaserlichts und der auftreffenden zweiten Harmonischen im wesentlichen identisch sind. Das Summenfrequenzlicht breitet sich auf der gleichen Seite aus wie das auftreffende Licht zweierlei Art.

Vom Grundlaserlichtstrahl, dem Lichtstrahl der zweiten Harmonischen und dem Lichtstrahl der Summenfrequenz unterscheiden sich die optischen Wege der beiden letzteren vom optischen Weg des Grundlaserlichts, und zwar wegen der Dispersionswirkung des Prismas, so daß sie aus dem Laserresonator ausgeblendet werden. Dabei ist die Oberfläche des Prismas 10 vorzugsweise mit einem Antireflexionsüberzug versehen, der die Reflexionsverluste bei den drei Wellenlängen verringert. Auch die Oberflächen der laseraktiven Substanz 1, der die zweite Harmonische erzeugenden Substanz 2 und der die Summenfrequenzwelle erzeugenden Substanz 3, auf die das Grundlaserlicht, die zweite Harmonische und die Summenfrequenzwelle treffen, können mit Antireflexionsüberzügen versehen sein. Dies gilt für die folgenden Beispiele.

Fig. 6 zeigt ein fünftes Beispiel des erfindungsgemäßen Generators. Das Prisma 10 der Fig. 5 ist durch einen Reflektor 11 ersetzt, der gegenüber dem Grundlaserlicht stark durchlässig ist, während seine Oberfläche 11', die zur Substanz 3 zur Erzeugung der Summenfrequenzwelle gerichtet ist, das Summenfrequenzlicht stark reflektiert. Der Reflektor 11 ist so angeordnet, daß die Oberfläche 11' gegenüber dem optischen Weg des Resonators einen spitzen Winkel bildet. Demzufolge weicht das vom Material 3 erzeugte Summenfrequenzlicht vom optischen Weg des Resonators ab und wird aus diesem ausgeblendet. Die Oberfläche 11" des Reflektors 11, die zur laseraktiven Substanz 1 weist, ist vorzugsweise so angeordnet, daß das Grundlaserlicht senkrecht auf dieselbe fällt.

509849/0731

Fig. 7 zeigt ein sechstes Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Generators. Dieser enthält anstelle des Prismas 11 der Fig. 6 einen herkömmlichen flachen Reflektor 12, der das Laserlicht in starkem Maße durchläßt und das Summenfrequenzlicht in starkem Maße reflektiert. Dieses Ausführungsbeispiel hat die gleichen Auswirkungen wie das der Fig. 6. Der Reflektor 12 kann gegenüber der zweiten Harmonischen des Lichts reflektierend sein.

Fig. 8 zeigt ein siebentes Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Generators. Hierbei ist ein akustischer Wandler 14 an einem Ende des Prismas 10 der Fig. 5 angeordnet, so daß das Prisma als Ultraschall-Q-Schalter oder Sperr-einrichtung wirkt. Selbstverständlich kann zu diesem Zweck auch ein getrennter Modulator bei dem vorstehend beschriebenen Resonator verwendet werden. Gegenüber einem getrennten Modulator ist dieses Ausführungsbeispiel darin vorteilhaft, daß die Lichtverluste des Resonators vermindert werden können. Durch die Verwendung des Modulators ergibt sich ein scharfer Anstieg der Spitzenenergie des Grundlaserlichts bei Impulsbetrieb, was bei der Wellenlängenumwandlung von großem Vorteil ist. Es sei darauf hingewiesen, daß dieses Ausführungsbeispiel auf den Reflektor 11 der Fig. 6 oder den Reflektor 12 der Fig. 7 anwendbar ist.

Fig. 9 zeigt ein achttes Ausführungsbeispiel der erfindungsgemäßen kohärenten Lichtquelle. Bei dieser sind zwischen der laseraktiven Substanz 1 (z.B. mit Neodymium dotierter Yttriumaluminiumgranatkristall (Nd:YAG)) und einem Reflektor 4, eine akusto-optische Beugungseinrichtung 6, eine die Summenfrequenzwelle erzeugende Substanz 6 und eine die zweite Harmonische des Lichts erzeugende Substanz 2 in dieser Reihenfolge von links nach rechts angeordnet. Als Substanz 2 zur Erzeugung der zweiten Harmonischen wird vorzugsweise ein die  $90^\circ$ -Phasen Anpassungsbedingung erfüllendes Material verwendet, beispielsweise Bariumnatriumniobat ( $\text{Ba}_2\text{Na}_2\text{Nb}_5\text{O}_{15}$ ), Kaliumniobat ( $\text{KNbO}_3$ ), Lithiumniobat

( $\text{LiNbO}_3$ ) oder Cäsiumdihydrogenarsenat ( $\text{CsH}_2\text{AsO}_4$ ). Als die Summenfrequenzwelle erzeugende Substanz 3 wird ein nicht-lineares optisches Material verwendet, beispielsweise Lithiumjodat ( $\text{LiIO}_3$ ) oder Ammoniumdihydrogenphosphat ( $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ). Die akusto-optische Beugungseinrichtung 6 ist gegenüber dem optischen Weg geneigt, so daß die dritte Harmonische  $L_3$  des Grundlaserlichts unter dem Bragg'schen Winkel einfällt. Der Bragg'sche Winkel ergibt sich aus folgender Beziehung:

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{2\Lambda}$$

worin  $\lambda$  und  $\Lambda$  die Wellenlängen des Lichts bzw. der akustischen Welle und der Winkel  $\theta$  der Winkel zwischen der Wellenfront der akustischen Welle und des Wellenvektors des auftreffenden Lichtstrahls sind. Bekanntermaßen wird das unter dem Bragg'schen Winkel einfallende Licht in einer Richtung intensiv gebrochen, wenn die Energie der akustischen Welle in geeigneter Weise gewählt wird.

Das durch angeregte Emission im laseraktiven Material erzeugte Grundlaserlicht  $L_1$  erzeugt in dem aus den Reflektoren 4 und 5 gebildeten Resonator die Laserschwingung. Da in diesem Fall die akusto-optische Beugungseinrichtung 6 so angeordnet ist, daß die Bedingung des Bragg'schen Einfallwinkels bezüglich der dritten Harmonischen  $L_3$  erfüllt ist, tritt das Laserlicht  $L_1$  ohne wesentliche Brechung durch dieselbe hindurch. Das Laserlicht  $L_1$  fällt auf die die zweite Harmonische  $L_2$  erzeugende Substanz 2, und die zweite Harmonische tritt aus der Substanz nach zwei Seiten, gemäß der Darstellung der Figur nach rechts und links, aus. Die direkt nach links austretende zweite Harmonische  $L_2$  fällt auf die die Summenfrequenzwelle erzeugende Substanz 3. Andererseits wird die nach rechts austretende zweite Harmonische  $L_2$  vom Reflektor 4 reflektiert und tritt durch die die zweite Harmonische erzeugende Substanz 2 hindurch, so daß sie ebenfalls auf die die Summenfrequenzwelle erzeugende Substanz 3 fällt. Die resultie-

509849/0731

rende auftreffende zweite Harmonische  $L_2$  und das Laserlicht  $L_1$ , das von der Seite des Reflektors 4 auf die die Summenfrequenzwelle erzeugende Substanz 3 trifft, wirken auf die Substanz 3 so, daß das summenfrequente Licht oder die dritte Harmonische  $L_3$  erzeugt wird und gemäß der Darstellung der Figur nach links austritt. Der größere Teil der dritten Harmonischen  $L_3$  wird durch die akusto-optische Beugungseinrichtung 6 in einer Richtung abgelenkt (gemäß Fig. 9 nach links und oben) und aus dem Resonator ausgeblendet.

Fig. 10 zeigt ein neuntes Ausführungsbeispiel des Generators zur Erzeugung kohärenten Lichts. Der Unterschied dieses Ausführungsbeispiels gegenüber dem der Fig. 9 besteht darin, daß zur Ausblendung der zweiten Harmonischen  $L_2$  aus dem Resonator ein weiterer Reflektor 7 zwischen der laseraktiven Substanz 1 und der die Summenfrequenzwelle erzeugenden Substanz 3 angeordnet ist. Der Reflektor 7 reflektiert die zweite Harmonische  $L_2$  und läßt die Laserschwingung  $L_1$  durch. Ein Teil der von rechts auf die die summenfrequente Welle erzeugende Substanz 3 treffenden zweiten Harmonischen wird in die dritte Harmonische  $L_3$  umgewandelt, während der durchgelassene restliche Teil auf die akusto-optische Beugungseinrichtung 9 fällt. Obwohl die auf die akusto-optische Beugungseinrichtung 6 fallende zweite Harmonische  $L_2$  zum Teil gebeugt wird, wird sie zum größeren Teil durchgelassen. Die durchgelassene Komponente wird vom zur optischen Achse schief angeordneten Reflektor 7 reflektiert und aus dem Resonator ausgeblendet (in Fig. 10 nach rechts und oben).

Bei dem Ausführungsbeispiel der Fig. 10 kann der Reflektor 7 durch eine akusto-optische Beugungseinrichtung ersetzt werden, die so angeordnet ist, daß der Bragg'sche Auffallwinkel bezüglich der zweiten Harmonischen  $L_2$  erfüllt ist. Die Verwendung der akusto-optischen Beugungseinrichtung 6 anstelle des selektiven Reflektors ist vorteilhaft, da die Wellenlängendifferenz zwischen dem Grundlicht und der dritten



Harmonischen übermäßig groß ist. D.h., der selektive Reflektor muß mit einem besonderen Überzug versehen sein, der für Licht der einen Wellenlänge stark durchlässig (z.B. im Infrarotbereich) und gegenüber Licht einer anderen Wellenlänge (z.B. ultraviolett) stark reflektierend ist. Die akusto-optische Beugungseinrichtung kann dagegen so betrieben werden, daß sie durch die Bragg'sche Beugung selektiv auf Licht einer gewünschten Wellenlänge einwirkt.

Als zehntes Ausführungsbeispiel sei ein Fall beschrieben, in dem die Modulation des Laserlichts an der akusto-optischen Beugungseinrichtung 6 erfolgt, die als wellenlängen-selektive Einrichtung in jedem der Systeme der Fig. 9 und 10 verwendet wird. Dabei ist die akusto-optische Beugungseinrichtung 6 gemäß Fig. 11 aufgebaut. Sie enthält ein akusto-optisches Medium, akustische Wandler 9 und 9', deren Resonanzfrequenzen den Wellenlängen der akustischen Wellen entsprechen, die den Bragg'schen Auftreffwinkel bezüglich des Laserlichts  $L_1$  bzw. der dritten Harmonischen  $L_3$  erfüllen, und Hochfrequenzgeneratoren 13 und 15 zur Erzeugung der Resonanzfrequenzen der akustischen Wandler 9 bzw. 9'. Die Hochfrequenzgeneratoren werden durch einen Schalter 16 und einen Amplitudenmodulationssignal-generator 17 gesteuert. Wird der akustische Wandler 9 so betrieben, daß die Bedingung des Bragg'schen Auftreffwinkels gegenüber dem Laserlicht  $L_1$  erfüllt ist, so wird das Laserlicht zum größeren Teil durch die akusto-optische Beugungseinrichtung 6 gebeugt, und es findet keine Laserschwingung statt. Wenn durch Umschaltung des Schalters 16 nur der akustische Wandler 9' betrieben wird, so daß die Bedingung des Bragg'schen Auftreffwinkels gegenüber der dritten Harmonischen  $L_3$  erfüllt ist, so wird das Laserlicht  $L_1$  zum größten Teil durchgelassen, so daß die Laserschwingung stattfinden kann. Außerdem wird die dritte Harmonische gebeugt und aus dem Resonator ausgeblendet. Das heißt, die Impulsschwingung, beispielsweise

509849/0731

die Q-Schaltung, kann durch Änderung der Wellenlänge der akustischen Schwingung mit dem Schalter 16 realisiert werden. Bei diesem Ausführungsbeispiel wird ein scharfer Anstieg der Spitzenenergie des Grundlaserlichts durch Impulsbetrieb erreicht. Es ist bei der Wellenlängenumwandlung vorteilhaft.

Es ist auch möglich, die Intensität des gebeugten Lichts durch Modulation der Amplitude der akustischen Schwingung mit dem Amplitudenmodulationssignalgenerator 17 zu modulieren. Hierbei kann eine variable Ausgangsintensität des summenfrequenten Lichts erzielt werden.

Bei dem beschriebenen Ausführungsbeispiel entsprechen die Resonanzfrequenzen der akustischen Wandler 9 und 9' den Wellenlängen der akustischen Schwingungen, die die Bedingung des Bragg'schen Auftreffwinkels für Licht der Wellenlängen  $L_1$  und  $L_3$  erfüllen. Es können aber an dem akusto-optischen Medium 8 auch akustische Wandler mit identischer Resonanzfrequenz derart angebracht werden, daß die Neigungen ihrer Wellenfronten die Bedingung des Bragg'schen Auftreffwinkels für Licht der Wellenlängen  $L_1$  bzw.  $L_3$  erfüllen. Ferner können die beiden getrennten Wandler durch einen einzigen, breitbandigen Wandler ersetzt werden, der die  $L_1$  und  $L_3$  entsprechenden akustischen Wellenlängen abdeckt.

Fig. 12 zeigt ein elftes Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Generators für kohärentes Licht. Erfindungsgemäß ist es nicht notwendig, daß sich das laseraktive Material 1 innerhalb desjenigen Resonators befindet, in dem das die zweite Harmonische erzeugende Material 2, das die Summenfrequenzwelle erzeugende Material 3 und die akusto-optische Beugungseinrichtung 6 befinden.

Bei dem Ausführungsbeispiel der Fig. 12 befindet sich das laseraktive Material in einem Resonator, der von dem Reso-

nator getrennt ist, in dem sich das selektive Element, das die zweite Harmonische erzeugende Material und das die Summenfrequenzwelle erzeugende Material befinden. Gemäß Fig. 12 ist das laseraktive Material 1 innerhalb eines aus Reflektoren 25 und 26 aufgebauten Resonators angeordnet. Ein Laserlicht  $L_1$  wird über den Reflektor 25 abgeleitet, der einen Teil des Lichts  $L_1$  durchläßt. Das Laserlicht  $L_1$  wird in den aus den Reflektoren 4 und 5 aufgebauten Resonator eingeleitet und in diesem eingefangen. Das Verfahren zur wirkungsvollen Erzeugung der dritten Harmonischen  $L_3$  in dem aus den Reflektoren 4 und 5 aufgebauten Resonator und zur wirkungsvollen Ausblendung desselben nach außen ist der gleiche wie beim Beispiel der Fig. 9. Um auch die zweite Harmonische  $L_2$  auszublenden, ist zwischen dem Reflektor 5 und der akusto-optischen Beugungseinrichtung 6 ein Reflektor oder eine akusto-optische Einrichtung angeordnet, die die zweite Harmonische  $L_2$  reflektieren und die Grundwelle  $L_1$  durchlassen. Natürlich braucht das Laserlicht  $L_1$  nicht stets, wie in diesem Beispiel gezeigt, von der Seite des Reflektors 5 einzufallen, sondern es kann auch von der Seite des Reflektors 4 einfallen.

Das erfindungsgemäße Prinzip ist nicht nur bei mit Neodymium dotierten Yttriumaluminiumgranatkristallen (Nd:YAG), sondern auch bei anderen Arten von laseraktiven Substanzen anwendbar. In jedem Fall stellt der erfindungsgemäße Generator zur Erzeugung kohärenten Lichts eine Lichtquelle dar, mit der wirtschaftlich Licht kurzer Wellenlängen erzeugt werden kann.

Zur wirtschaftlichen Wellenlängenumwandlung müssen die Grundwelle und die Höherharmonischen gleiche Phasengeschwindigkeiten im nichtlinearen optischen Material haben, d.h., die sogenannte Phasenabstimmungsbedingung muß erfüllt sein. Ein allgemeines Verfahren zur Verwirklichung der Bedingung in einem streuenden Medium besteht darin, daß

ein optisch anisotroper Kristall als nichtlineares optisches Material verwendet und die Grundwelle und die Höherharmonischen unterschiedlich voneinander polarisiert werden. Hierdurch wird die Differenz der Phasengeschwindigkeiten infolge der Streuung durch die anisotropen Brechungsindizes kompensiert. Zur genauen Einstellung der Phasenanpassung muß die Beziehung zwischen der Hauptachse des Indexellipsoids des Kristalls und die Ausbreitungsrichtung des Lichts (der Phasenanpassungswinkel) und die Temperatur des Kristalls genau eingestellt werden.

Zur genaueren Erläuterung sei der Fall betrachtet, daß das infrarote Licht des Nd:YAG-Lasers mit einer Wellenlänge von  $1,06 \mu$  in seine zweite Harmonische umgewandelt wird, nämlich in grünes Licht mit der Wellenlänge von  $0,53 \mu$ . Wird ein Kristall, der auf die  $90^\circ$ -Phasenbeziehung gebracht werden kann, als nichtlineares optisches Material verwendet, beispielsweise Bariumnatriumniobat oder Kaliumniobat, und wird die Temperatur des Materials entsprechend eingestellt, so kann die Phasenanpassung bei einem Winkel erreicht werden, bei dem die Ausbreitungsrichtungen der Grundwelle und der zweiten Harmonischen mit einer der Hauptachsen des Indexellipsoids übereinstimmen. In einem solchen Fall entstehen keine Schwierigkeiten.

Wird aber ein Material wie Lithiumjodat verwendet, so stimmt der Winkel, bei dem die Phasenanpassung erreicht wird, nicht mit der Hauptachse des Indexellipsoids des Kristalls überein. Dabei werden, wie in Fig. 13 gezeigt, infolge der Doppelbrechung durch den Kristall 2 die Ausbreitungsrichtungen der Grundwelle  $L_1$  und der zweiten Harmonischen  $L_2$  getrennt, die beispielsweise aus gewöhnlichem und außergewöhnlichem Licht bestehen. Da die beiden Lichtstrahlen nicht vollkommen aufeinanderliegen, wird der Wirkungsgrad der Wellenlängenumwandlung verschlechtert. Wird die Länge des Kristalls in der Ausbreitungsrichtung des Lichts größer gemacht, so

wird der Querschnitt des Strahls der zweiten harmonischen Welle, die aus außergewöhnlichem Licht besteht, abgeflacht, wie durch die Kurve 19 angedeutet. Dies führt in der Anwendung zuweilen zu zusätzlichen Unzuträglichkeiten. Der Querschnitt 20 der Grundwelle  $L_1$ , die aus gewöhnlichem Licht besteht, wird durch den Durchtritt des Strahls durch den Kristall nicht deformiert. Bei Lasern jedoch, beispielsweise dem Nd:YAG-Laser, bei denen das Grundlaserlicht unpolarisiert ist, kann aber eine außergewöhnliche Lichtkomponente von der optischen Achse abweichen.

Der wesentliche Vorteil der Erfindung besteht in der Verminderung der Trennung zwischen der ersten Lichtquelle (z.B. der Grundwelle oder der Grundwelle und ihrer Höherharmonischen) und der zweiten, in ihrer Wellenlänge umgewandelten Lichtwelle (z.B. der zweiten Harmonischen oder einer beliebigen Höherharmonischen). Hierdurch ergibt sich eine kohärente Lichtquelle, in der die parametrische Wellenlängenumwandlung (Erzeugung Höherharmonischer und optische Mischung) mit hohem Wirkungsgrad erfolgt.

Hierzu ist erfindungsgemäß wenigstens eines der nichtlinearen optischen Materialien zur Verwendung in den bisher beschriebenen Summenfrequenzgeneratoren aus mehreren Kristallen aufgebaut, die mehrstufig längs der Ausbreitungsrichtung der ersten Lichtwelle aufgereiht sind. Zusätzlich sind die Kristalle so in einer Reihe angeordnet, daß die Hauptachsen der Indexellipsoide der angrenzenden Kristalle bezüglich der Ausbreitungsrichtung der ersten Lichtwelle zueinander Nebenwinkel bilden können.

Im folgenden wird die Herstellung eines Ausführungsbeispiels der Einrichtung zur parametrischen Wellenlängenumwandlung erläutert. In Fig. 14 sind mit  $L_1$  die Grundwelle (gewöhnliches Licht) und mit  $L_2$  die zweite Harmonische (außergewöhnliches Licht) bezeichnet. Nichtlineare optische Kristalle 2A, 2B, 2C und 2D sind so aneinandergereiht, daß, wie

509849/0731

durch die Pfeile an den linken Enden der einzelnen Kristalle gezeigt, die Hauptachsen der Indexellipsoide benachbarter Kristalle bezüglich der Ausbreitungsrichtung der Grundwelle Nebelwinkel bilden. Das heißt, es ist  $\theta' = 180^\circ - \theta$ . Die Abstände zwischen den einzelnen Kristallstücken sind so klein, daß die Phasenverschiebungen in ihnen vernachlässigbar klein sind. Bei diesem Aufbau unterscheiden sich die Ausbreitungsrichtungen der zweiten Harmonischen in den aneinander angrenzenden Kristallstücken voneinander. Die Verschiebung zwischen der Grundwelle und der zweiten Harmonischen, die vom ersten Kristall 2A hervorgerufen wird, wird durch den zweiten Kristall 2B korrigiert. Da sich dies schrittweise wiederholt, wird, auch wenn die Gesamtlänge der Kristalle groß ist, der Querschnitt 19 des zweiten harmonischen Lichtstrahls nicht extrem flach. Darüberhinaus ist die Überlagerung des Querschnitts 19 mit dem Querschnitt 20 des Grundwellen-Lichtstrahls gut. Die Phasenwinkel-Anpassungsbedingung ist stets erfüllt, weil der Neigungswinkel der Ausbreitungsrichtung des Lichts zur Hauptachse des Kristalls in allen Kristallstücken nicht variabel ist. Statt auf die beschriebene mehrstufige Kaskadenverbindung aus vier Kristallstücken ist die Erfindung auf eine beliebige Anzahl von wenigstens zwei Kristallstücken anwendbar. Der Phasenanpassungswinkel  $\theta$  variiert in Abhängigkeit von der Kristallart und der Wellenlänge des Lichts. Wird beispielsweise das Licht mit der Wellenlänge von  $1,06 \mu$  des Nd:YAG-Lasers in das Licht der zweiten Harmonischen mit der Wellenlänge von  $0,53 \mu$  durch Lithiumjodat umgewandelt, so beträgt der Anpassungswinkel bei normaler Temperatur etwa  $30^\circ$ .

Anhand von Fig. 15 sei ein weiteres Ausführungsbeispiel des Aufbaus der Einrichtung zur parametrischen Wellenlängenumwandlung, nämlich die Anwendung auf die optische Mischung, erläutert. Unter optischer Mischung wird die Bildung von summenfrequentem oder differenzfrequentem

Licht aus zwei Lichtwellen verstanden. Bei der in Fig. 15 gezeigten Anordnung sind  $L_1$  die Grundwelle des Lichts des Nd:YAG-Lasers der Wellenlänge von  $1,06 \mu$  und  $L_2$  die zweite Harmonische desselben mit der Wellenlänge von  $0,53 \mu$ . Nichtlineare Kristallstücke 3A und 3B bestehen aus Lithiumjodat. Es ist wünschenswert, daß die beiden auftreffenden Lichtstrahlen Polarisationsrichtungen haben, in denen sie bezüglich des Kristalls zu ordentlichem Licht werden. Weiter sollten sie soweit als möglich räumlich aufeinanderliegen. Infolge des nichtlinearen Zusammenwirkens wird im Kristall die dritte Lichtwelle  $L_3$  erzeugt. Die Frequenz der dritten Lichtwelle ist gleich der Summe der Frequenzen der beiden einfallenden Lichtstrahlen. Das heißt, die dritte Lichtwelle entspricht der dritten Harmonischen des Lichts mit der Wellenlänge von  $1,06 \mu$ , das einen der einfallenden Lichtstrahlen darstellt. Es ist ultraviolett und hat eine Wellenlänge von  $0,355 \mu$ . Die erzeugte dritte Harmonische wird außerordentliches Licht. Ihre Ausbreitungsrichtung weicht von den Ausbreitungsrichtungen der einfallenden Lichtstrahlen ab. Infolge des bereits erwähnten wesentlichen Merkmals der Erfindung wird die Verschiebung der dritten Harmonischen gegenüber den einfallenden Lichtstrahlen durch den mehrstufigen Aufbau verhindert, der aus zwei oder mehr Kristallstücken besteht: Bei diesem Ausführungsbeispiel ist der Phasenanpassungswinkel etwa  $47^\circ$ .

Statt der oben erwähnten können verschiedene andere nichtlineare optische Materialien verwendet werden. Die nichtlineare Wellenlängenumwandlung ist ebenfalls auf einfallendes Licht anwendbar, dessen Wellenlänge sich von der oben erwähnten unterscheidet. Der Phasenanpassungswinkel ist abhängig von der Art des Kristalls, der Temperatur, der Wellenlängen des einfallenden Lichts und der Höherharmonischen, und so weiter. In all diesen Fällen ist das wesentliche Merkmal der Erfindung erreichbar.

Die Erfindung ist auf vielerlei Gebieten anwendbar, auf denen kohärente Lichtquellen erforderlich sind, beispielsweise bei der Isotopentrennung, der optischen Informationsverarbeitung und bei der spektroskopischen Analyse und Anzeige, bei denen Laser angewendet werden. Die Erzeugung der dritten Harmonischen aus dem Nd:YAG-Laser bildet eine brauchbare Quelle für kohärentes ultraviolettes Licht, das auf diesen Gebieten in weitem Maße angewendet wird.

Der erfindungsgemäße Generator ist bei der Laseranzeige, der Laserspektroskopie usw. als Einrichtung zur Erzeugung mehrerer kohärenter Lichtstrahlen unterschiedlicher Wellenlänge anwendbar. Es ist möglich, die ultraviolette dritte Harmonische durch Farbstoffe, fluoreszente Materialien oder dergleichen in sichtbares Licht umzuwandeln. Auch kann unter Verwendung von Farbstoffen, fluoreszentem Material oder dergleichen als laseraktives Material und seine Erregung durch die zweite oder dritte Harmonische Laserlicht unterschiedlicher Wellenlänge erzeugt werden. Beispielsweise ist bei einem Nd:YAG-Laser einer Wellenlänge von  $1,06 \mu$  die zweite Harmonische grünes Licht von  $0,53 \mu$ . Durch Erregung geeigneter Farbstoffe, beispielsweise Rhodaminfarbstoffen, mit der zweiten Harmonischen kann rotes Laserlicht erzeugt werden. Ähnlich kann durch Erregung von beispielsweise Coumarinfarbstoffen mit der dritten Harmonischen von  $0,35 \mu$  blaues Laserlicht erzeugt werden. Eine kohärente Lichtquelle der so erhaltenen drei Farben ist auf dreifarbige Laseranzeigeeinrichtungen anwendbar.

Falls erwünscht, kann das Grundlaserlicht aus dem Resonator ausgeblendet werden, indem der Spiegel 4, 5, 6 oder 8 bei dieser Wellenlänge leicht durchlässig gemacht oder die Oberfläche 11' oder 12' oder der Reflektor 7 bei dieser Wellenlänge leicht reflektierend gemacht wird.

Wie erläutert, kann durch den erfindungsgemäßen Generator



summenfrequentes Licht oder Licht der dritten Harmonischen wirtschaftlich aus dem Grundlaserlicht und der zweiten Harmonischen erzeugt werden, ohne daß der Kristall zur Erzeugung der zweiten Harmonischen zerstört wird. Darüberhinaus können größere Teile der erzeugten zweiten und dritten Harmonischen wirtschaftlich aus dem Laserresonator ausgeblendet werden.

Anstelle der die  $90^\circ$ -Phasenabgleichbedingung erfüllenden Materialien als Substanzen zur Erzeugung der zweiten Harmonischen können beliebige nichtlineare optische Materialien verwendet werden, die die  $90^\circ$ -Phasenanpassungsbedingung nicht erfüllen, wenn nicht die Lichtstrahlen unterschiedlicher Wellenlänge räumlich merklich voneinander abweichen. Gleichfalls können andere als die vorstehend erwähnten nichtlinearen optischen Materialien als Substanz 3 zur Erzeugung der dritten Harmonischen verwendet werden. Obwohl in jedem Fall die Erfüllung der  $90^\circ$ -Phasenanpassungsbedingung wünschenswert ist, kann die Substanz beliebig gewählt werden.

P a t e n t a n s p r ü c h e

1. Generator zur Erzeugung kohärenten Lichts, mit einem optischen Resonator, einem laseraktiven Material, einem wellenlängenselektiven Element zur Ausblendung einer Lichtwelle bestimmter Wellenlänge aus dem optischen Resonator, einem eine Summenfrequenzwelle erzeugenden Material und einem eine zweite Harmonische erzeugenden Material, dadurch g e k e n n z e i c h n e t, daß das selektive Element (6, 10, 11, 12), das die Summenfrequenz erzeugende Material (3) und das die Harmonische erzeugende Material (2) in dem optischen Resonator (4, 5) in einer solchen Reihenfolge angeordnet sind, daß längs des optischen Weges des optischen Resonators das laseraktive Material (1) auf der einen und das die summenfrequente Welle und das die zweite Harmonische erzeugende Material auf der gegenüberliegenden Seite des selektiven Elements angeordnet sind.
2. Generator nach Anspruch 1, dadurch g e k e n n z e i c h n e t, daß das die summenfrequente Welle erzeugende Material zwischen dem selektiven Element (6, 10, 11, 12) und dem die zweite Harmonische erzeugenden Material (2) angeordnet ist.
3. Generator nach Anspruch 1, dadurch g e k e n n z e i c h n e t, daß innerhalb des optischen Resonators

(4, 5) ein akusto-optischer Lichtmodulator (12) angeordnet ist.

4. Generator nach Anspruch 1, dadurch g e k e n n - z e i c h n e t, daß das selektive Element aus mehreren Spiegeln (6) besteht, die das Grundlaserlicht reflektieren und die zweite Harmonische und/oder das summenfrequente Licht durchlassen.
5. Generator nach Anspruch 1, dadurch g e k e n n - z e i c h n e t, daß das selektive Element aus einem Prisma (10, 11) besteht.
6. Generator nach Anspruch 5, dadurch g e k e n n - z e i c h n e t, daß das Prisma (10, 11) mit einer Oberflächenschicht versehen ist, die das Grundlaserlicht durchläßt und das summenfrequente Licht reflektiert.
7. Generator nach Anspruch 1, dadurch g e k e n n - z e i c h n e t, daß das selektive Element aus einem Reflektor (6) besteht, der das Grundlaserlicht durchläßt und das summenfrequente Licht reflektiert.
8. Generator nach Anspruch 1, dadurch g e k e n n - z e i c h n e t, daß das selektive Element aus einem Prisma (12) besteht, an dessen einem Ende ein akustischer Wandler (14) befestigt ist.

509849/0731

9. Generator nach Anspruch 1, dadurch g e k e n n z e i c h n e t, daß das selektive Element (6) aus einer akusto-optischen Beugungseinrichtung (9, 9') besteht, die das summenfrequente Licht selektiv beugt.
10. Generator nach Anspruch 9, g e k e n n z e i c h n e t durch einen zusätzlichen Reflektor (5), der die zweite Harmonische reflektiert.
11. Generator nach Anspruch 9, dadurch g e k e n n z e i c h n e t, daß die akusto-optische Beugungseinrichtung mit zwei getrennten Wandlern (9, 9') versehen ist, die je bei der akustischen Frequenz betrieben werden, die dem Bragg'schen Winkel bezüglich des Grundlaserlichts und der dritten Harmonischen desselben entspricht.
12. Generator nach Anspruch 1, dadurch g e k e n n z e i c h n e t, daß wenigstens eines der Materialien (2, 3) zur Erzeugung der zweiten Harmonischen und der Summenfrequenzwelle aus mehreren Kristallstücken (2A, 2B, 2C, 2D; 3A, 3B) aufgebaut ist, die längs des optischen Weges des optischen Resonators (4, 5) so mehrstufig angeordnet sind, daß die Hauptachsen der Indexellipsoide der aneinander angrenzenden Kristallstücke Nebenwinkel zueinander bezüglich des optischen Weges bilden können.

13. Generator zur Erzeugung kohärenten Lichts, mit einem in einem optischen Hohlraum angeordneten laseraktiven Material, einem wellenlängenselektiven Element, einem die zweite Harmonische erzeugenden Material und einem eine Summenfrequenzwelle erzeugenden Material, die in einem zweiten optischen Hohlraum angeordnet sind, dadurch gekennzeichnet, daß das die Summenfrequenzwelle erzeugende Material (3) und das die zweite Harmonische erzeugende Material (2) auf der einen und das laseraktive Material (1) auf der anderen Seite des selektiven Elements (6) angeordnet sind.
14. Generator zur Erzeugung kohärenten Lichts, gekennzeichnet durch einen optischen Resonator (4, 5) für eine optische Welle einer Basisfrequenz, durch ein Material (2) zur Erzeugung einer zweiten Harmonischen aus der Basisfrequenz, das innerhalb des Resonators angeordnet ist, durch ein Material (3) zur Erzeugung einer summenfrequenten Welle zur Mischung mehrerer optischer Wellen und zur Erzeugung einer optischen Welle, deren Frequenz die Kombination aus den Frequenzen der mehreren optischen Wellen bildet, das innerhalb des Resonators angeordnet ist, und durch ein wellenlängenselektives Element (6) zur Ausblendung einer optischen Welle einer bestimmten Wellenlänge aus dem Resonator, das auf einer Seite des die Summenfrequenzwelle erzeugenden Materials angeordnet ist,

während das die zweite Harmonische erzeugende Material auf der anderen Seite des die Summenfrequenz erzeugenden Materials angeordnet ist.

- 35 -

FIG. 1

2522338

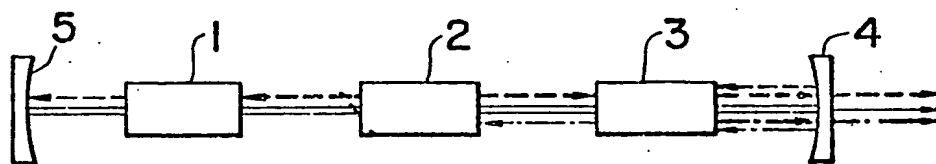


FIG. 2

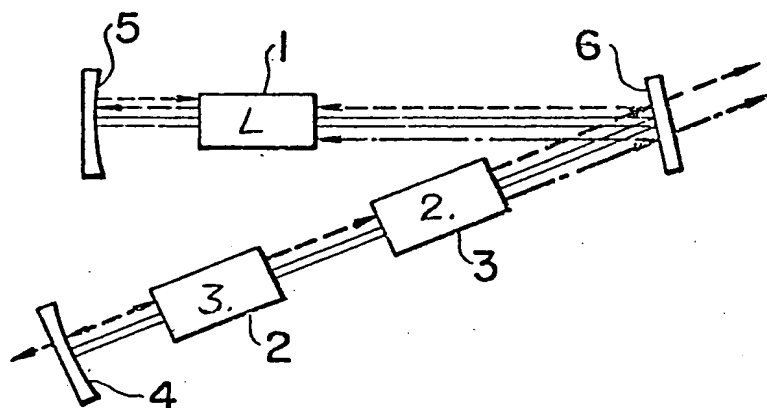
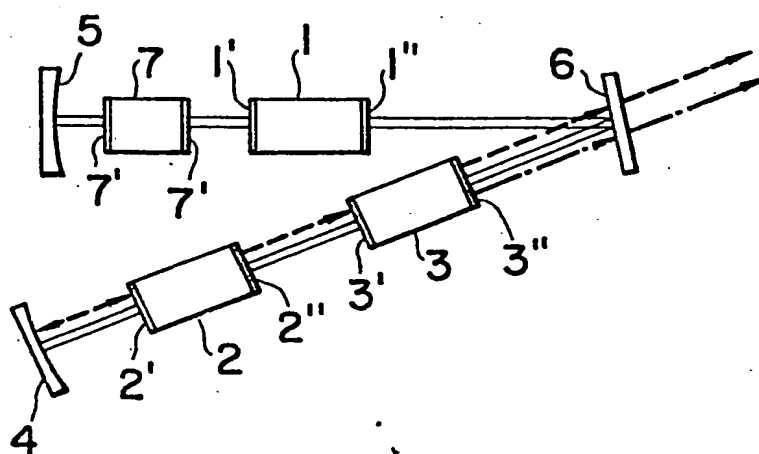


FIG. 3



509849/0731

FIG. 4

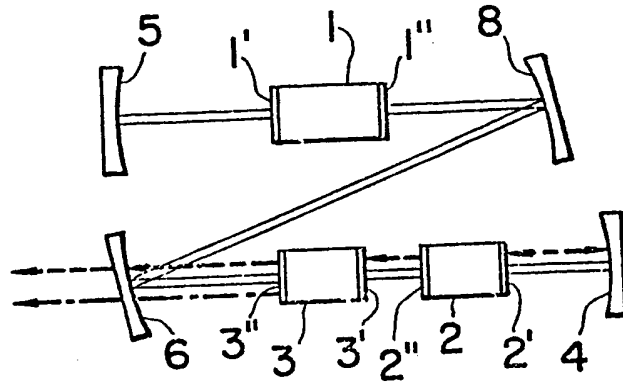


FIG. 5

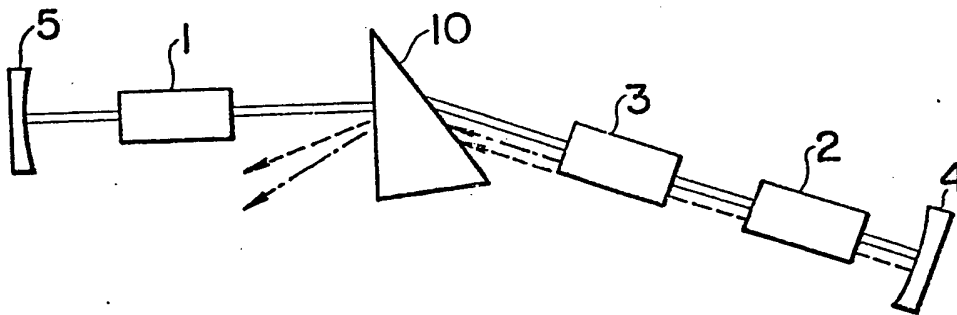


FIG. 6

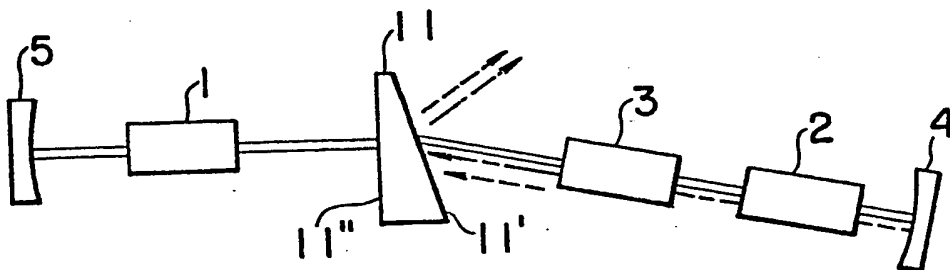




FIG. 7

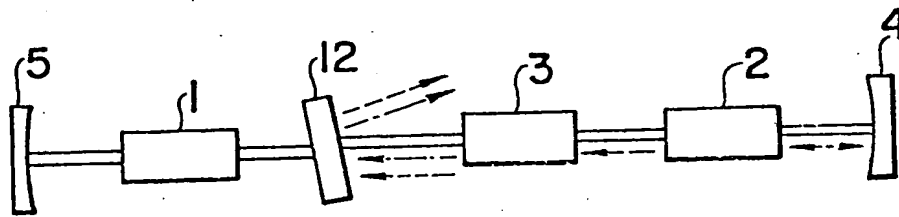


FIG. 8

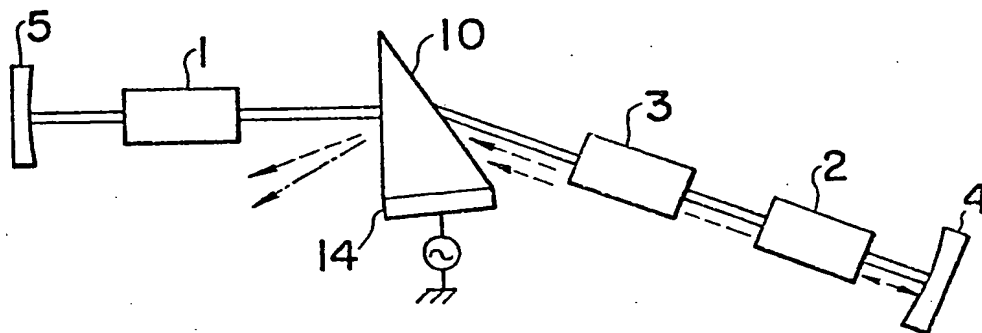


FIG. 9

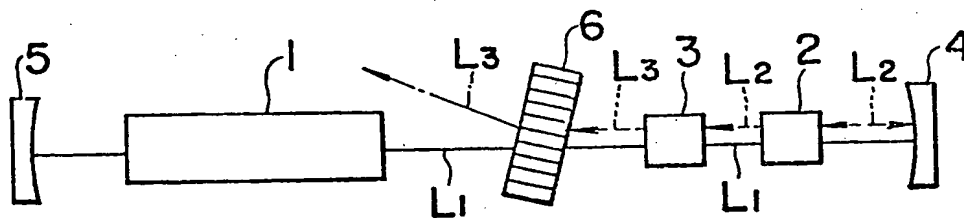


FIG. 10

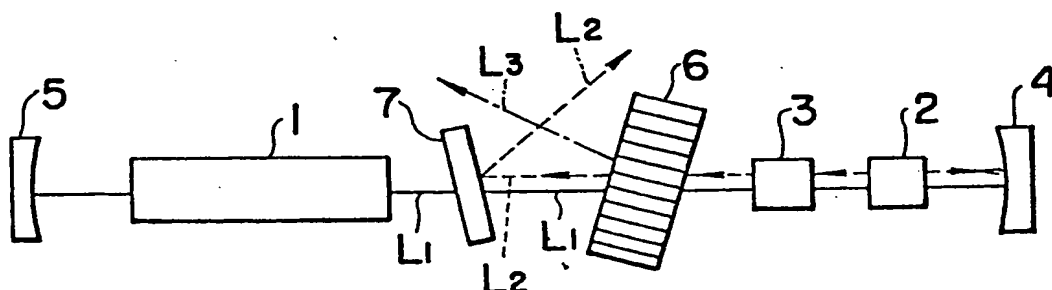


FIG. 11

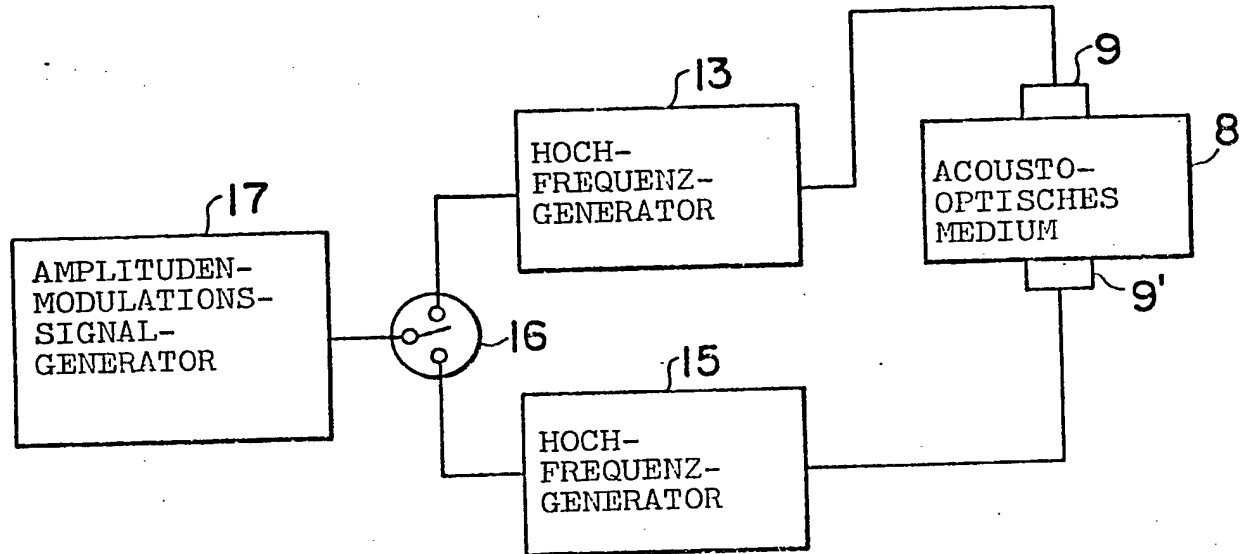


FIG. 12

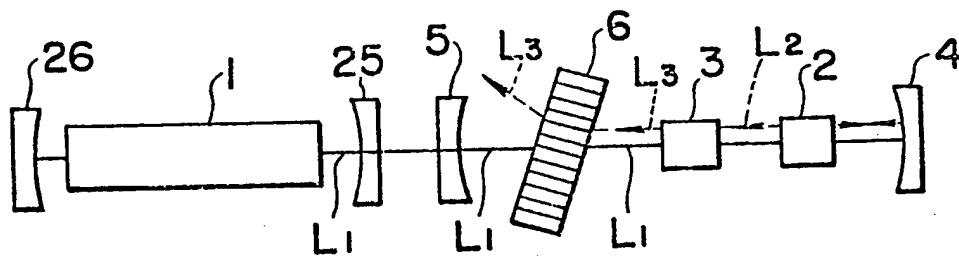
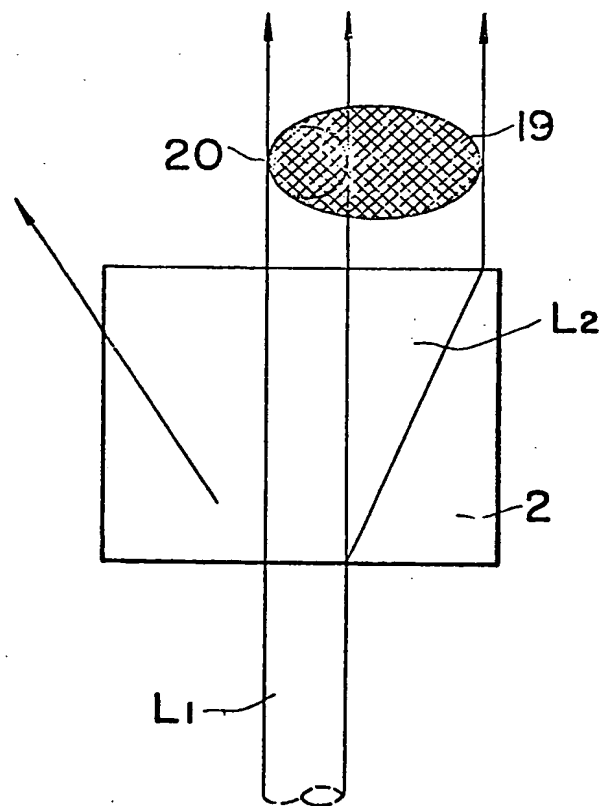


FIG. 13



509849/0731

34.

FIG. 14

2522338

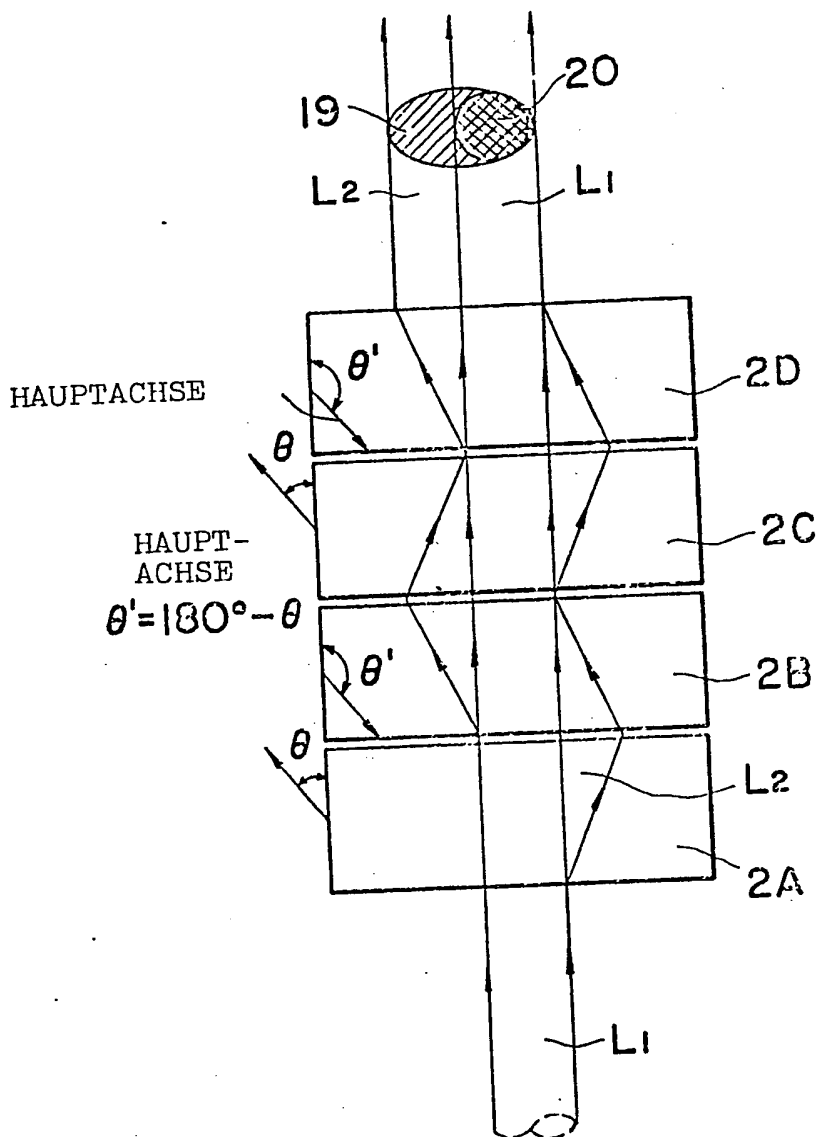
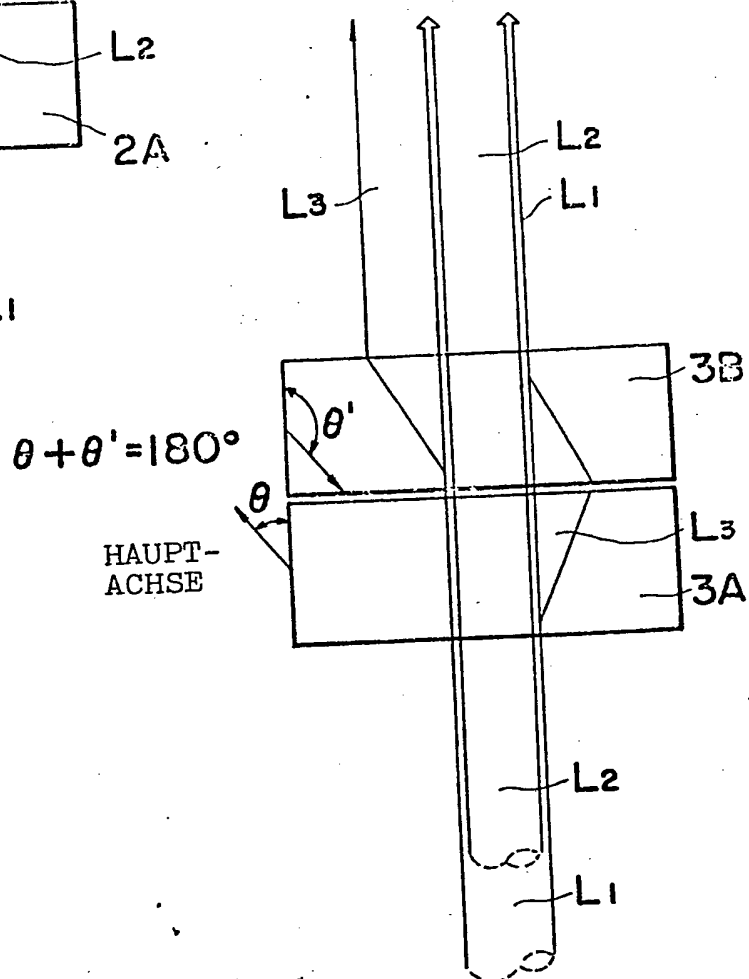


FIG. 15



509849/0731

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**